

# Le projet PEGASE

Marc Stubbe, Karim Karoui, Tractebel Engineering

Thierry Van Cutsem, Fonds de la Recherche scientifique (FNRS) et Université de Liège

Louis Wehenkel, Université de Liège, Département d'Electricité, Electronique et Informatique

Mots clés: Systèmes électriques européens, réseaux, estimation d'état, écoulement de charge optimisé, simulation dynamique, algorithme, temps réel, plan de recherche.

## Sommaire

*Un groupe de Gestionnaires de Réseau de Transport (GRT), de sociétés expertes et de centres de recherche de premier plan en analyse des systèmes électriques et en mathématiques appliquées, a décidé de s'associer, sous la coordination de Tractebel Engineering, pour développer des méthodologies et des outils logiciels capables de contrôler, simuler et analyser l'ensemble du Réseau électrique Européen Interconnecté (REI).*

*Ce projet, appelé PEGASE, fait partie du 7ème Programme Cadre de la Commission Européenne (CE). Son budget est d'environ 13 MEUR. Il a démarré en septembre 2008 et durera 4 ans.*

*PEGASE prévoit de définir l'architecture, les flux de données et les algorithmes d'estimation d'état pour le REI. Il considérera l'usage de technologies émergentes comme les mesures de phaseurs synchronisées par GPS. Donner accès en temps réel à la connaissance de l'état du REI à chaque GRT améliorerait de façon spectaculaire leur coordination, pour autant que de nouvelles idées soient proposées pour présenter efficacement les énormes quantités de données du REI. Ce point fait aussi partie de la recherche.*

*La simulation statique du REI exige de prendre en compte les règles d'exploitation et les pratiques de réglages des différents réseaux nationaux. De nouveaux algorithmes seront développés, basés sur des techniques d'optimisation et le «bon sens» de l'ingénieur.*

*La simulation dynamique du REI est d'une importance capitale pour mieux contrôler et évaluer la sécurité de ce vaste système. PEGASE prévoit de construire un prototype de moteur de simulation capable de reproduire tout type de comportement du REI. Ce moteur sera conçu dans le but de jouer les scénarios les plus extrêmes, jusqu'au «black-out» du REI et la reprise du service qui s'en suit. Il sera intégré dans une maquette de simulateur temps réel pour l'entraînement des dispatchers. Des outils simplifiés de simulation dynamique, capables de calculer beaucoup plus rapidement que le temps réel, seront développés pour l'évaluation en ligne de la sécurité du système. Si les principales difficultés du projet sont la taille et l'hétérogénéité du REI, la méthodologie de modélisation retiendra également l'attention.*

*La modélisation de composants du système doit faire face à la complexité introduite par les technologies de l'information et l'électronique de puissance en usage actuellement dans le système électrique.*

*Les bibliothèques de modèles standard rencontrent certaines limites et une plus grande flexibilité de modélisation est nécessaire pour représenter des processus nouveaux ou pour échanger des modèles entre GRTs.*

## Abstract

*A group of Transmission System Operators (TSO's), expert companies and leading research centers in power system analysis and applied mathematics, under the coordination of Tractebel Engineering, has joined to develop methodologies and software tools able to monitor, simulate and analyze the European Transmission Network (ETN).*

*This project called PEGASE is part of the 7th Framework Programme of the European Commission. Its budget is about 13 MEUR. It started in September 2008 and will last for 4 years.*

*It will define the architecture, data flows and algorithms of an ETN state estimator making use of emerging technologies like the GPS-synchronized Phasor Measurement Units (PMUs). Giving access to the state of the ETN to each TSO would improve dramatically their coordination provided that new ideas to display huge amounts of ETN data are proposed. This is also part of the research.*

*The static simulation of the ETN requires to take into account the various operating rules and control practices of each national grid. New algorithms will be developed, based on optimization techniques and sound engineering judgment. The dynamic simulation of the ETN is of paramount importance for better control and security assessment of this large-scale system. PEGASE will build a prototype of a simulation engine capable of reproducing all kinds of behavior of the ETN. Such an engine will be designed to play extreme scenarios up to*

*the complete black-out of Europe and its subsequent restoration. It will require algorithmic breakthroughs and advanced computer architecture. It will be embedded in a mock-up of a real time dispatcher training simulator. Simplified dynamic simulation tools, able to run much faster than real time, will be developed for on-line security assessment.*

*If the main challenge of the project remains the size and the heterogeneity of the ETN, special attention will be paid to modeling methodology. Component models have to face the complexity introduced by IT and power electronic technologies presently used in power systems.*

*Standard model libraries reach some limits and a greater modeling flexibility is needed to introduce new devices in software tools or exchange models between operators.*

### Samenvatting

*Een groep transportnetbeheerders (TNB's), gespecialiseerde bedrijven en onderzoekscentra die een vooraanstaande rol spelen in de analyse van elektriciteitssystemen en in toegepaste wiskunde, zal onder coördinatie van Tractebel Engineering methodes en software ontwikkelen voor de controle, simulatie en analyse van het volledige Europese elektriciteitsnet (European Transmission Network - ETN).*

*Het project kreeg de naam PEGASE en maakt deel uit van het zevende kaderprogramma van de EC. Dit project, met een budget van ongeveer 13 mln. euro, ging in september 2008 van start en zal vier jaar duren.*

*PEGASE zal de architectuur, de gegevensstromen en de algoritmen voor de state estimations van het ETN bepalen. Daarbij zal het gebruik van opkomende technologieën, zoals via gps gesynchroniseerde metingen, in overweging worden genomen. Door alle TNB's in real time toegang te verlenen tot de informatie over de status van het ETN, zou de onderlinge coördinatie veel vlotter verlopen, op voorwaarde dat ze nieuwe ideeën bedenken om de enorme hoeveelheden gegevens van het ETN efficiënt weer te geven. Dit punt wordt onderzocht.*

*Bij de statische simulatie van het ETN moet rekening worden gehouden met de exploitatieregels en de wetten betreffende de regeling van alle nationale netten. Nieuwe algoritmen zullen worden ontwikkeld op basis van optimalisatietechnieken en het gezond verstand van de ingenieur. De dynamische simulatie van het ETN is van essentieel belang voor het onderzoek naar de veiligheid van het systeem. PEGASE zal een prototype van een simulatiemotor bouwen die elk gedrag van het ETN kan simuleren. Door zijn ontwerp zal deze motor het mogelijk maken de meest extreme scenario's, zelfs een «black-out» van het ETN en de daaropvolgende herinschakeling, te simuleren. De motor zal worden geïntegreerd in een model van een real-time simulator van de dispatcheropleiding. Vereenvoudigde tools voor dynamische simulatie, die veel sneller berekeningen kunnen uitvoeren dan in real time, zullen worden ontwikkeld voor de online-evaluatie van de veiligheid van het systeem.*

*De omvang en heterogeniteit van het ETN zijn de grootste knelpunten van het project, maar ook de modelleringmethode zal de nodige aandacht krijgen. Bij de modellering van de systeemonderdelen moet rekening worden gehouden met de complexiteit ontstaan door de informatietechnologieën en de vermogenselektronica die momenteel in het elektriciteitssysteem worden gebruikt. De bibliotheken van standaardmodellen zijn niet langer geldig. Om nieuwe processen te kunnen weergeven of modellen tussen TNB's te kunnen uitwisselen, moet de modellering flexibeler worden.*

### Introduction

Durant la deuxième partie du siècle dernier, les réseaux nationaux européens se sont progressivement interconnectés, essentiellement pour partager les réserves de production à mettre en œuvre en cas de déclenchement d'une unité de production de grande taille. Le réglage, l'équilibre production-demande et la sécurité des réseaux nationaux étaient assurés localement (concept de zone de réglage). Aujourd'hui, les interconnexions sont renforcées pour permettre la mise en œuvre du marché européen de l'électricité, voire l'extension de la zone d'échange aux pays périphériques (Russie, Turquie, ...).

Mais au-delà de ces changements structurels on observe des changements internes. En effet, le raccordement massif de sources intermittentes (éoliennes) et le développement de la production décentralisée affectent profondément l'exploitation et la sécurité du système. La multiplication des liens à courant continu haute tension (HVDC) et les nouvelles technologies comme les FACTS (Flexible AC Transmission Systems) ou les interfaces électroniques des nouvelles sources d'énergie, modifient considérablement le comportement des réseaux. De plus, la présence d'échanges massifs de puissance entre Gestionnaires de Réseau de Transport (GRT) augmente

l'influence mutuelle entre les zones de réglage.

Pour maintenir un haut niveau de sécurité dans ce nouveau contexte, la conduite des réseaux par les divers GRTs doit être beaucoup plus intégrée que par le passé, ce qui requiert des outils de conduite plus puissants que ceux actuellement en usage.

Le projet PEGASE concerne le développement d'algorithmes et de prototypes d'applications logicielles dans le domaine de l'estimation d'état, de l'optimisation et de la simulation dynamique des grands systèmes électriques. Il est supposé établir le socle technique d'une

nouvelle génération d'outils d'aide à la conduite (préparation et temps réel), et des simulateurs d'entraînement, et ceci quelle que soit l'évolution de l'organisation de la conduite du Réseau Européen Interconnecté (REI).

PEGASE est en ligne avec les priorités de recherche mises en avant dans le projet RELIANCE (voir article sur le sujet dans ce numéro de la Revue E).

## Les besoins du réseau européen interconnecté

### Visibilité du REI par ses divers gestionnaires

L'exploitant a évidemment besoin de connaître l'état du système qu'il surveille. Il dispose pour cela, dans son centre de conduite, d'un estimateur d'état qui est une application logicielle qui détermine l'état électrique (tensions, courants, puissances, etc...) du réseau à partir des données de la télémétrie. Ce modèle de l'état «le plus probable» du réseau ainsi constitué servira de base à toutes les applications de calcul en ligne.

Actuellement, chaque TSO dispose de son propre estimateur d'état, traitant essentiellement le modèle de son réseau, augmenté de modèles (très) simplifiés des réseaux extérieurs. Il est alimenté par la télémétrie interne à la zone de réglage, complétée de quelques mesures en temps réel provenant des réseaux périphériques.

L'incident du 4 novembre 2006 a montré clairement les limites de cette approche qui ne permet pas d'informer l'opérateur d'événements significatifs (incidents graves, déclenchements en cascade, séparation en sous-réseaux), dès lors qu'ils sont situés en dehors de sa zone d'observation.

La mise à disposition de chaque GRT d'une «photo» de l'état de l'ensemble du réseau européen, mise à jour à la cadence requise, constituerait une évolution majeure pour la gestion des crises pouvant mener à un blackout généralisé, mais aussi, en période normale, pour la gestion de l'intermittence de la production éolienne ou encore celle des congestions survenant typiquement sur les lignes d'interconnexion.

### Analyse en ligne de la sécurité

Le manque actuel de connaissance de l'état des réseaux voisins constitue un handicap grave pour la précision de l'analyse de la sécurité (qui consiste à évaluer l'impact d'incidents probables). En effet, s'il est parfaitement possible d'obtenir une estimation d'état du réseau interne sans beaucoup se préoccuper des réseaux extérieurs, il devient tout à fait nécessaire de connaître avec précision la structure et l'état des réseaux voisins pour simuler correctement leurs réactions aux incidents. Ceci est d'autant plus vrai que l'interconnexion est forte et que l'incident simulé est proche de la frontière. Symétriquement, l'impact d'événements se produisant dans les réseaux extérieurs doit être davantage pris en compte dans le diagnostic de sécurité. En conséquence, on voit un intérêt évident à procéder aux analyses individuelles de sécurité à partir d'un modèle commun du REI, ce qui permettrait aussi de mieux coordonner les manœuvres et réglages correctifs destinés à restaurer la sécurité préventive. Notons que la conception de ces actions correctives requiert des outils d'aide à la décision qui appartiennent actuellement encore au domaine de la recherche.

### Le besoin en simulation dynamique avancée

À l'heure actuelle, l'analyse de la sécurité repose généralement sur un modèle statique. Il apparaît de plus en plus nécessaire, lorsque l'on se rapproche des limites de fonctionnement du système, de vérifier la qualité de la transition entre les états d'équilibre avant et après incident, mais aussi la stabilité du système, c'est-à-dire sa capacité à rejoindre l'état d'équilibre final.

Le modèle dynamique est aussi indiqué pour une représentation précise des protections et automates qui répondent en fonction du comportement transitoire du réseau. Il est nécessaire pour déterminer les limites de stabilité du système telles que, par exemple, l'apparition d'oscillations interzonales résultant d'une augmentation du transit de puissance entre réseaux.

Enfin, la simulation de tout scénario complexe pouvant mener au «blackout» exige l'usage d'un modèle dynamique très détaillé.

Par ailleurs, la simulation temporelle «Haute Fidélité» reste la seule voie pour acquérir une compréhension profonde du comportement des grands systèmes électriques. Elle apparaît comme indispensable à la formation avancée des opérateurs des centres de conduite. Si le modèle mathématique du système électrique et de ses composants est en principe bien connu, sa mise en œuvre peut poser des problèmes majeurs résultant:

- de la taille du modèle (jusqu'à 100.000 variables d'état, voire plus, pour le REI);
- de la complexité du modèle (phénomènes appartenant à des échelles de temps très différentes, non-linéarités);
- du temps de calcul ;
- de la disponibilité des données.

La taille du système est malheureusement difficile à maîtriser car la modélisation doit être complète en (presque) toute circonstance, les différents phénomènes dynamiques étant généralement enchevêtrés.

La gestion de la complexité implique des procédures rigoureuses de développement des modèles de composants et leur validation.

Le temps de calcul reste une barrière importante pour beaucoup d'applications. Des développements algorithmiques et l'utilisation d'architectures informatiques spécialisées s'imposent.

On notera enfin que la construction du modèle dynamique repose sur l'effort conjugué de toutes les parties prenantes: GRT, producteurs, constructeurs agissant de manière concertée pour une meilleure sécurité du système.

## Le projet PEGASE

Le projet PEGASE (Pan European Grid Advanced Simulation and state Estimation) répond à un appel d'offre du 7<sup>ème</sup> Programme Cadre de la Commission Européenne référencé «ENERGY.2007.7.2.1. Simulation and state estimation of smart electricity transmission networks».

### Constitution du Consortium

Le Consortium a été créé sur base d'une définition précise de l'expertise à



mettre en œuvre et d'une répartition claire des rôles. Il comporte:

## 8 GRTs:

CDO (Russie),  
HEP (Croatie),  
Lietuvos Energija (Lituanie),  
REE (Espagne),  
REN (Portugal),  
RTE (France),  
TEIAS (Turquie),  
Transelectrica (Roumanie).

## 7 Universités:

Universität Duisburg-Essen (Allemagne),  
Technische Universiteit Eindhoven (Pays-Bas),  
Université de Liège (Belgique),  
University of Manchester (Royaume-Uni),  
Ecole Centrale de Paris (France),  
Riga Technical University (Lettonie),  
Universitat de Sevilla (Espagne).

## 1 Centre de recherche:

INRIA (France).

## 4 Bureaux d'études:

Deling Doo (Bosnie),  
Energosetproject (Russie),  
FGH (Allemagne),  
Tractebel Engineering (Belgique).

## 1 Constructeur spécialisé:

ELIOP (Espagne).

La coordination administrative et scientifique est assurée par Tractebel Engineering. Le budget total du projet est d'environ 13 MEUR, pour un subside européen de 8 MEUR.

## Le plan de recherche de PEGASE

La recherche a démarré en septembre 2008 et durera 4 ans. Il est évidemment beaucoup trop tôt pour rapporter des résultats. Nous résumons ci-après le plan de recherche initial.

Le cœur du projet PEGASE consiste à concevoir des algorithmes avancés et à construire des prototypes capables de démontrer la faisabilité de l'estimation d'état (temps réel), de l'optimisation sous contraintes et de la simulation dynamique «Haute Fidélité», appliquées à de très grands systèmes et tenant compte d'une exploitation par des GRTs multiples, comme c'est le cas pour le REI.

Les relations entre les différentes

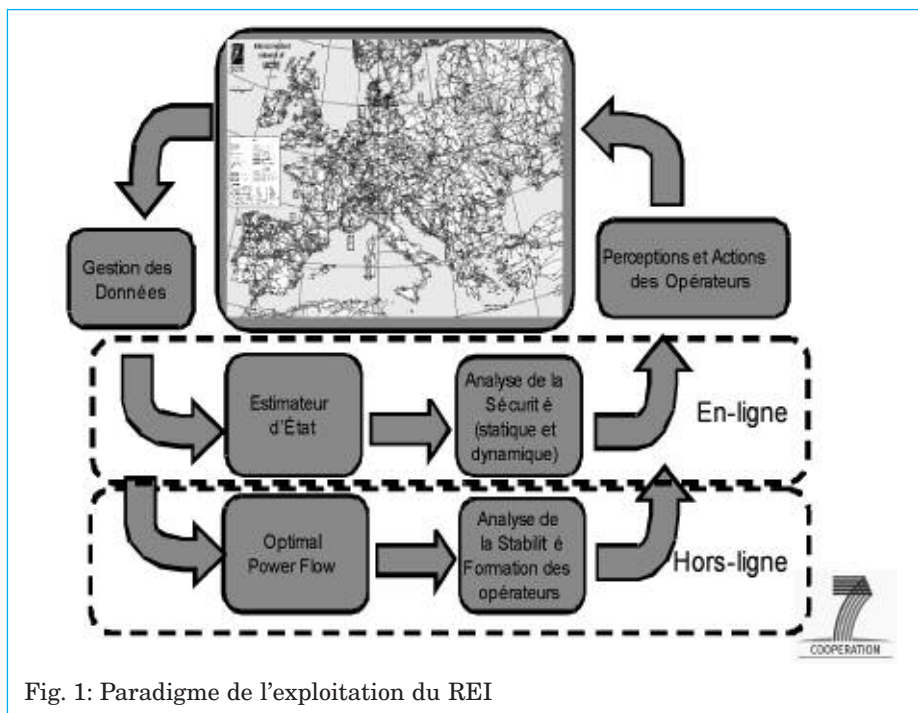


Fig. 1: Paradigme de l'exploitation du REI

fonctions de calcul sont présentées à la Fig. 1.

## L'estimation d'état

C'est la pierre angulaire de la surveillance et l'exploitation du REI et la clef d'entrée des calculs en ligne. Les ambitions de PEGASE sont grandes: développer la technologie capable de fournir à tous les GRTs une vue synchrone de l'état du REI, très proche du temps réel (idéalement toutes les 10s). Des algorithmes capables de résoudre l'estimation d'état de très grands systèmes existent mais ne traitent pas la spécificité du REI et de son exploitation par des GRTs multiples. L'objectif est de fournir à chaque GRT une situation du REI qui sera synchronisée à son estimateur d'état local. Une maquette sera construite et testée sur le terrain. Des développements spécifiques sont programmés pour utiliser au mieux la présence attendue de mesures de phases synchronisées par GPS.

## L'optimisation sous contraintes

Il s'agit ici de réaliser un programme d'écoulement de charge optimisé (en anglais: Optimal Power Flow ou OPF) permettant:

- la modélisation des règles d'exploitation typiques des GRTs;
- la détermination automatique d'actions correctives ou préventives, dans le

cadre de la gestion des congestions, y compris lorsqu'il y a interaction entre GRTs.

Une fois encore, des logiciels d'OPF capables de simuler et optimiser des grands réseaux existent depuis longtemps mais d'importantes limitations persistent, comme la modélisation d'un grand nombre de contraintes de sécurité post-incident. On attend de PEGASE des progrès significatifs voire décisifs pour:

- une vitesse de calcul accrue en présence de très grands systèmes;
- un meilleur traitement et une plus grande robustesse de la modélisation des contrôles discrets;
- un traitement efficace des contraintes de sécurité post-incident;
- la définition flexible de la coordination des stratégies de conduite de GRTs voisins.

Ces résultats seront intégrés dans des outils industriels et testés sur un modèle du REI.

## La simulation temporelle

Les objectifs de PEGASE en matière de simulation dynamique sont particulièrement ambitieux:

- développer un outil d'étude capable de concilier une précision très élevée et une vitesse de calcul non contraignante

pour l'utilisateur et ceci pour les plus grands réseaux et pour les scénarios les plus sévères;

- développer un moteur de simulation temps réel capable de simuler tout type de transitoires, en particulier électromécaniques, et insérer celui-ci dans un simulateur d'entraînement capable de jouer des scénarios les plus complexes sur l'entière du REI;

- développer un outil d'évaluation de la sécurité préventive basé sur la simulation dynamique. La vitesse de calcul étant primordiale, des modèles simplifiés spécialisés dans la recherche d'instabilités typiques (écroulement de tension, déclenchements d'ouvrages en cascade, etc...) seront implémentés et testés.

Le Consortium, à travers la participation de RTE et Tractebel Engineering est particulièrement bien placé pour réaliser une percée dans le domaine de la simulation dynamique. Ces partenaires développent ensemble, et depuis près de 20 ans, le logiciel EUROSTAG qui est une référence mondiale. Ils collaboreront intensivement avec l'Ecole Centrale de Paris, la Technische Universiteit Eindhoven et l'Université de Liège pour atteindre les ambitions du projet.

Le comportement dynamique d'un système électrique est très complexe et présente plusieurs mécanismes de propagation de l'incident initial pouvant conduire à un écroulement du système (perte de synchronisme, instabilité de fréquence ou de tension, déclenchements en cascade, etc.).

De plus, ces différents mécanismes, rapides ou lents, peuvent s'enchevêtrer. Sachant le système non linéaire, oscillant et souvent faiblement amorti, il n'est pas étonnant que la résolution du modèle mathématique soit délicate.

EUROSTAG utilise une méthode implémente simultanée à pas variable maîtrisant bien la précision de calcul.

Cependant, au vu des défis posés par la taille du REI, le développement de l'électronique de puissance et l'objectif de simulation en «temps réel», des progrès spectaculaires sont nécessaires en matière de vitesse de calcul. Trois pistes de recherche sont poursuivies:

- 1) la parallélisation du calcul du modèle électromécanique complet en revisitant

les tentatives passées infructueuses et en adaptant l'algorithme pour utiliser au mieux les importants gains en vitesse de communication interne des ordinateurs multiprocesseurs les plus récents;

- 2) le calcul distribué reposant sur une approche de «waveform relaxation»: le réseau est divisé en plusieurs zones simulées en parallèle et ensuite soumises aux conditions «frontières» des voisins, jusqu'à convergence;

- 3) les algorithmes «multirate»: l'état de l'art utilise une méthode d'intégration à pas uniforme «dans l'espace» mais variable dans le temps. La recherche portera sur le développement d'une approche basée sur la variation spatiale du pas de temps, dans laquelle les variables les plus rapides, souvent relatives à des composants spatialement proches, seront mises à jour avec un pas de temps plus petit que celui appliqué aux variables «lentes».

Les trois pistes évoquées ci-dessus sont essentiellement complémentaires. En les combinant, les gains se multiplieront.

Enfin un développement parallèle sera poursuivi: la simplification du modèle mathématique, si possible automatisée, orientant la modélisation vers un phénomène particulier (par exemple, l'écroulement de tension ou les variations de la fréquence moyenne du système) et conduisant à éliminer les phénomènes les plus rapides supposés stables, suivant l'approche quasi-statique, qui conduit à des vitesses de calcul beaucoup plus élevées, tout en fournissant des résultats très utiles pour l'évaluation en ligne de la sécurité du réseau.

## Modélisation et convivialité

PEGASE proposera une méthodologie générale de modélisation des composants actifs du système, y compris les régulateurs et les protections, et proposera une méthode de validation des modèles et données.

Le Consortium estime qu'il y a lieu de faire une distinction claire entre modèle et algorithme et a l'intention de proposer l'usage de méta-langages et de solveurs reconnus comme outils de création (et d'échange) de nouveaux modèles. Il existe déjà des méta-lan-

gages pour les régulateurs et processus des centrales, mais ceux-ci seront étendus aux protections et aux automates. Les Interfaces Hommes-Machines (IHM) feront aussi l'objet d'un effort spécifique. Il est en effet indispensable d'adapter les IHM des centres de conduite à la présentation des résultats de l'estimation d'état du REI dans la partie «extérieure» à la zone contrôlée. C'est un problème spécifique et entièrement nouveau.

## Conclusion

PEGASE constitue une tentative de mise à niveau des applications logicielles des centres de conduite pour répondre aux nouveaux défis de l'exploitation du REI résultant de la libéralisation des marchés de l'électricité et des changements marquants dans les technologies de production d'électricité. Les défis sont énormes, après 20 ans de statu quo dans le domaine. Si toutes les pistes de recherche ne pourront entièrement aboutir, nous considérons que l'effort accepté par les partenaires et supporté par la Commission Européenne constituera une impulsion suffisante pour produire des avancées techniques décisives capables de contribuer significativement à la politique européenne en matière de sécurité du REI, d'intégration de l'énergie renouvelable et d'ouverture des marchés. Le Consortium a bien l'intention de communiquer les résultats de ses travaux, et de faire de ses succès comme de ses échecs des éléments de motivation pour la communauté des chercheurs de la discipline.